

굽힘진동 감쇠를 위한 점탄성 적층보의 최적 설계

김사수*, 조대승*, 이민우**

Optimum Design of Viscoelastic Layered Beam to Minimize Flexural Vibration

by

Sa-Soo Kim*, Dae-Seung Cho* and Min-Woo Lee**

요 약

감쇠가 적은 금속 구조물의 공진에 의한 진동과 소음을 제어하기 위해 고무, 아스팔트 계열 등의 점탄성 물질이 다양하게 사용되고 있다. 일반적으로 점탄성재료를 이용한 감쇠처리는 점탄성재료의 하부를 모재인 금속층에 취부하고 점탄성재료의 상부를 구속층으로 적층하는 방법을 적용한다. 구속감쇠층이 취부된 구조물의 감쇠 및 강성 특성은 온도와 주파수뿐만 아니라 각 층의 두께에 따라 크게 달라진다. 따라서 구조물을 경량화하고 감쇠처리 효과를 극대화하기 위해서는 점탄성층과 구속층 두께의 최적설계가 매우 중요하다.

본 연구에서는 구속감쇠층을 가진 보의 점탄성층과 구속층의 두께 변화에 따른 손실계수의 변화를 면밀히 검토하고, 이를 토대로 지정된 손실계수를 가지되 감쇠층과 구속층의 최소두께를 결정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 타당성은 수치실험적 방법으로 검증하였다.

Abstract

For the control of vibration and noise of metal structures having relatively low damping, viscoelastic materials are widely used and usually attached at metal structures with an additional constraining layer to secure them. The damping and elastic properties of structures having constrained viscoelastic material layers are dependent on not only temperature and frequency but also their thicknesses. Hence, optimal design of the thicknesses of viscoelastic and constraining layers for a certain base structure are very important to maximize their efficiency and to lighten their weight.

발 표 : 1997년도 대한조선학회 추계학술대회('97. 11. 14)

접수일자 : 1998년 4월 16일, 재접수일자 : 1998년 9월 11일

* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

** 부산대학교 대학원 조선공학과

In this study, the variation of loss factor of beams having a constrained viscoelastic layer according to the change of thickness has been carefully investigated. From these, optimal design method of the minimum thickness beam having a given loss factor is suggested and numerically verified for a real beam.

1. 서 론

강이나 알루미늄과 같이 감쇠가 작은 금속으로 구성된 구조물의 진동응답 및 이로 인한 방사소음을 줄이기 위하여 고무와 같은 점탄성 재료를 금속 구조물에 부착하여 감쇠를 증가시키는 방법에 대한 많은 연구가 수행되고 있다[1~9].

구조물에 점탄성 재료를 이용하여 감쇠를 증가시키는 방법은 구조물의 바깥 표면에 하나의 점탄성 재료층만을 부착하는 자유층 또는 비구속층 감쇠처리 방법과 이에 금속층으로 된 구속층을 적층하여 점탄성재료의 자유층을 덮는 구속층 감쇠처리 방법이 있다. 전자의 방법은 점탄성층이 굽힘변형에 대해서만 감쇠효과를 가지는 반면에 후자의 방법은 굽힘변형에 대해서는 물론 전단변형에 대한 감쇠효과도 가지므로 후자의 방법이 전자의 방법보다 감쇠효과가 좋은 것으로 평가되고 있다 [2]. 한편, 점탄성 재료는 온도, 주파수 및 두께에 따라 감쇠효과가 달라진다. 따라서, 진동 또는 소음을 제어하고자 점탄성 재료를 이용할 경우에는 이의 물성치는 물론 기초층의 두께에 따른 점탄성층과 구속층의 최적 두께를 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 점탄성 재료의 손실계수와 전단탄성계수를 실험을 통하여 구하고, 이를 이용하여 추정된 구속 감쇠 처리된 보의 손실계수를 실험결과와 비교·검토하였다. 또한, 기초층에 구속감쇠 처리를 할 경우 이의 최적설계를 위하여 지정된 손실계수를 가지되 구속층과 점탄성층의 두께의 합을 최소화 하는 방법에 대해 연구하였다.

2. 구속감쇠 적층보의 특성 해석

2.1 구속감쇠 적층보의 굽힘강성

점탄성재료는 외력이 가해지면 에너지의 일부를

복원 가능한 탄성에너지로 저장하고 나머지는 열 에너지 등으로 발산시키는 성질을 가진 재료로서 강성과 감쇠성을 동시에 지니고 있다. 따라서, 점탄성재료의 특성은 종탄성계수 E 와 손실계수 η 를 이용하여 다음 식과 같이 복소탄성계수 E^* 로 나타낸다.

$$E^* = E(1 + i\eta) \tag{1}$$

점탄성 재료는 굽힘변형으로 인한 신장감쇠 효과와 전단변형으로 인한 전단감쇠 효과를 가진다. 따라서, 신장감쇠효과는 구속층 유무에 관계없이 발생하는 데 반하여 전단감쇠 효과는 구속층 감쇠처리를 한 경우에만 발생한다. 신장 및 전단 감쇠 효과를 모두 발생할 수 있는 가장 간단한 구조는 Fig. 1에 보인 바와 같은 3층 적층구조이다. 이 구조는 Fig. 2에 보인 바와 같이 기초층에 외력이 작용할 경우 점탄성층이 기초층과 함께 ϕ 에 해당하는 굽힘 각변형을 함과 동시에 구속층으로 인하여 ϕ 에 해당하는 전단변형을 함으로서 신장감쇠 효과와 전단감쇠 효과를 가진다.

횡하중 작용시의 기초층, 점탄성층 및 구속층의 전단응력 차이로 인해 유발되는 굽힘모멘트를 고려하면 구속감쇠 처리로 인한 3층 적층보의 중립면은 기초층의 중립면으로부터

$$D = \frac{E_2 H_2 (H_{21} - H_{31}/2) + q(E_2 H_2 H_{21} + E_3 H_3 H_{31})}{E_1 H_1 + E_2 H_2/2 + q(E_1 H_1 + E_2 H_2 + E_3 H_3)} \tag{2}$$

만큼 이동한다[4]. 여기서, E_1, E_2, E_3 와 H_1, H_2, H_3 는 각각 기초층과 점탄성층 및 구속층의 종탄성계수와 두께를 나타내며, H_{21}, H_{31} 는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 각각 기초층과 감쇠층 중립

면 사이의 거리와 기초층과 구속층 중립면 사이의 거리이다. q 는 점탄성재료의 종탄성계수 E_2 와 전단탄성계수 G_2 가 주파수별로 달라지는 효과를 반영하는 상수로서 다음과 같이 정의된다.

$$q = \frac{G_2}{E_3 H_3 H_2 p^2} \quad (3)$$

여기서, p 는 파수(wave number)로서 구속감쇠 적층보의 굽힘강성 EI 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$p^4 = \frac{\omega^2 \mu}{EI} \quad (4)$$

여기서, μ 는 복합보의 단위길이당 질량, ω 는 원진동수이다. 한편, 정하중이 가해지는 경우에는 q 가 무한대의 값을 가지므로 D 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{E_2 H_2 H_{21} + E_3 H_3 H_{31}}{E_1 H_1 + E_2 H_2 + E_3 H_3} \quad (5)$$

식(5)는 순수 굽힘거동을 하는 기초층에 구속감쇠 처리를 한 경우의 중립면 변화량과 일치한다.

상기의 결과로부터 구속감쇠 적층보의 굽힘강성 EI 는

$$EI = E_1 \frac{H_1^3}{12} + E_2 \frac{H_2^3}{12} + E_3 \frac{H_3^3}{12} - E_2 \frac{H_2^2}{12} \left(\frac{H_{31} - D}{1 + q} \right) + E_1 H_1 D^2 + E_2 H_2 (H_{21} - D)^2 + E_3 H_3 (H_{31} - D)^2 - \left[\frac{E_2 H_2}{2} (H_{21} - D) + E_3 H_3 (H_{31} - D) \right] \left(\frac{H_{31} - D}{1 + q} \right) \quad (6)$$

와 같이 평가된다[4]. 굽힘강성의 실제 연산은 파수 p 가 굽힘강성에 따라 달라지므로 식(4)와 식(6)으로 연산되는 굽힘강성값이 일치하도록 하는 수치해석 과정을 요구한다.

2.2 구속감쇠 적층보의 손실계수

굽힘파수, 감쇠층 재료의 탄성계수와 두께, 구속층과 기초층의 굽힘강성 등에 의해 변화하는 구속감쇠 적층보의 손실계수와 굽힘강성은 통상 다음과 같은 2개의 무차원 매개변수를 정의하여 평가한다[1].

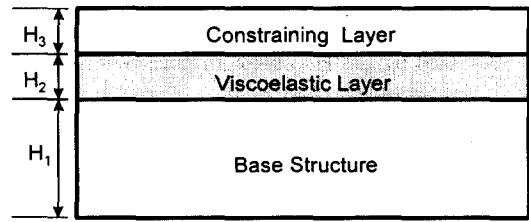


Fig. 1 Element of a three-layer beam

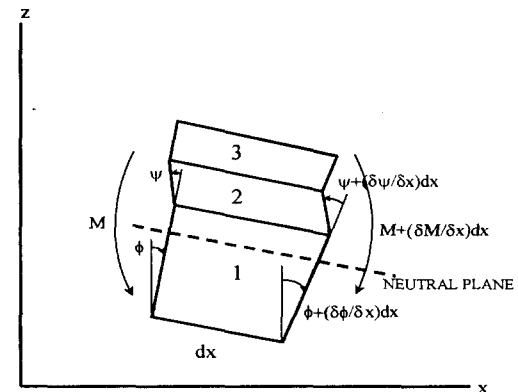


Fig. 2 Element of three-layer beam in flexural vibration

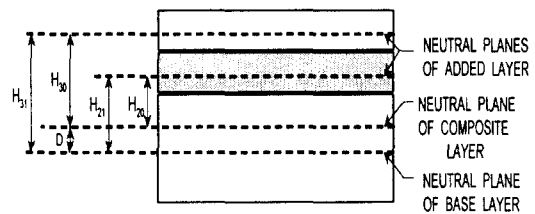


Fig. 3 Dimensions used in analysis of a three-layer beam in flexural vibration

-전단매개변수(shear parameter) g ;

$$g = \frac{G_2}{p^2 H_2} \left(\frac{1}{E_1 H_1} + \frac{1}{E_3 H_3} \right) \quad (7)$$

-기하학적 매개변수(geometric parameter) Y ;

$$Y = \frac{3e_3 h_3 (1 + 2h_2 + h_3)^2}{(1 + e_3 h_3)(1 + e_3 h_3^3)} \quad (8)$$

여기서,

$$e_3 = E_3/E_1, \quad h_2 = H_2/H_1, \quad h_3 = H_3/H_1$$

식(6)의 탄성계수 E 를 식(1)에 나타낸 복소탄성계수 E^* 로 대체하면 구속감쇠 적층보의 복소굽힘강성은 g 와 Y 에 대해서 다음과 같이 표현된다[1].

$$EK(1+i\eta) = (E_1I_1 + E_3I_3) \left[\frac{1+g(1+i\beta)(1+Y)}{1+g(1+i\beta)} \right] \quad (9)$$

여기서, β 는 점탄성층의 손실계수이다. 따라서, 구속감쇠 적층보의 손실계수 η 는

$$\eta = \frac{\beta g Y}{1 + (2+Y)g + (1+Y)(1+\beta^2)g^2} \quad (10)$$

와 같다.

3. 점탄성 재료의 물성치 평가[3]

점탄성재료의 물성치 시험방법은 기초층만으로 구성된 보와 기초층에 구속 또는 비구속 감쇠처리 한 보의 고유진동수 및 손실계수를 이용하여 점탄성재료만의 탄성계수와 손실계수를 구한다.

본 연구에서는 동일한 재질과 두께를 갖는 기초층과 구속층 사이에 점탄성 재료를 부착한 샌드위치보를 이용하여 점탄성 재료의 전단탄성계수와 손실계수를 구하였다.

구속감쇠 적층보의 기초층과 구속층의 재질과 두께가 같은 경우

$$H_{21} = \frac{(H_1 + H_2)}{2} \quad (11)$$

$$H_{31} = H_1 + H_2 \quad (12)$$

$$D = (H_1 + H_2) \frac{a}{1+2q} \quad (13)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 한편, 기초층 및 구속층의 종탄성계수보다 아주 작은 점탄성재료의 종탄성계수와 기초층 및 구속층 재료의 내부손실 효과

를 무시하면 구속감쇠 적층보의 복소굽힘강성은 식(1)과 식(6)으로부터

$$\begin{aligned} & \frac{EK(1+i\eta)}{6} + E_1H_1(H_1+H_2)^2 \frac{a(1+i\beta)}{1+2q(1+i\beta)} \\ & \quad (14) \end{aligned}$$

와 같이 나타낼 수 있다.

상기 식의 실수부와 허수부로부터 점탄성재료의 전단탄성계수 G_2 와 손실계수 β 는 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$G_2 = \frac{(A-B) - 2(A-B)^2 - 2(A\eta)^2}{(1-2A+2B)^2 + 4(A\eta)^2} \times \frac{E_1H_1H_2a_n}{L^2} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{A\eta}{A-B-2(A-B)^2-2(A\eta)^2} \quad (16)$$

여기서,

$$A = \left(\frac{\omega_n}{\omega_{1n}} \right)^2 (2 + \rho_2 h_2) \left(\frac{B}{2} \right) \quad (17)$$

$$B = \frac{1}{6(1+h_2)^2} \quad (18)$$

이고, ω_n 은 구속 감쇠 적층보의 n 번째 고유원진동수, ω_{1n} 은 금속보만의 n 번째 고유원진동수를 나타내며, ρ_2 는 점탄성재료의 밀도, a_n 은 n 번째 모드의 특성수(characteristic number)로서 보의 경계조건에 따라 Table 1에 보인 바와 같은 값을 가진다.

4. 구속감쇠 적층보의 최적 설계

구속감쇠 적층보의 손실계수는 식(10)에서 알 수 있듯이 점탄성층 및 구속층의 두께에 따라 변화한다. 따라서, 구속감쇠 적층보의 설계시 감쇠처리 비용과 활용 가능한 공간의 감소를 최소화하기 위해서는 점탄성층과 구속층의 두께에 대한 설계 최적화가 요구된다.

본 연구에서는 특정 점탄성 재료를 사용할 때에 기초층에 대한 점탄성층 두께비 h_2 와 구속층 두께비 h_3 를 설계변수로 하고 지정된 손실계수 η 를

Table 1 Characteristic number a_n

n	Clamped-Free	Clamped-Clamped	Free-Free
1	3.516	22.373	0
2	22.035	61.673	0
3	61.697	120.90	22.373
4	120.90	199.86	61.673
5	199.86	298.56	120.90
6	298.56	--	199.86
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
n	$\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4}$	$\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4}$	$\frac{(2n-3)^2 \pi^2}{4}$

갖는 구속감쇠 적층보의 두께를 최소화하고자 하였다. 이를 위하여 점탄성 재료의 손실계수 β 가 일정한 경우에 Y 와 g 의 변화에 따른 손실계수 η 의 변화와 h_2 와 h_3 의 변화에 따른 Y 의 변화를 살펴보았다.

Fig. 4와 Fig. 5에 β 가 1이고, 기초층과 구속층의 재질이 같은 경우 즉, e_3 가 1인 경우에 대해서만 그 결과를 예시하였는데, 이로부터 η 는 Y 에 비례하여 증가하고, Y 가 지정되면 g 의 특정값에서 최대값을 가짐을 알 수 있다. 또한, Y 는 h_2 에 비례하고, h_2 가 결정되면 h_3 의 특정값에서 최대값을 가짐을 알 수 있다.

상기의 결과로부터 지정된 손실계수 η 를 갖는 구속감쇠 적층보의 최소 두께는 Y 가 최소인 경우임을 알 수 있다. 따라서, Y 를 최소로 하는 전단매개변수 g 의 최적치 g_{opt} 을 $\frac{\partial \eta}{\partial g} = 0$ 의 조건으로부터

$$g_{opt} = \frac{1}{\sqrt{(1+Y)(1+\beta^2)}} \quad (19)$$

와 같이 결정하면, 지정된 손실계수 η 를 갖는 기하학적 매개변수의 최소치 Y_{opt} 은 식(19)를 식(10)에 대입하여

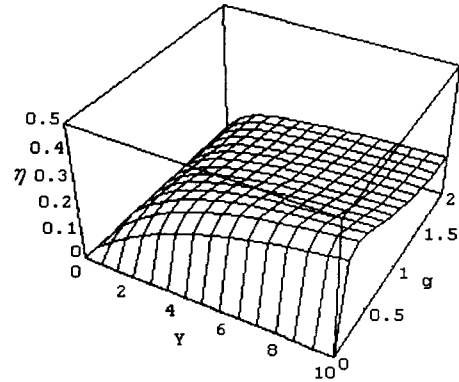


Fig. 4 Loss factor η vs. g and Y

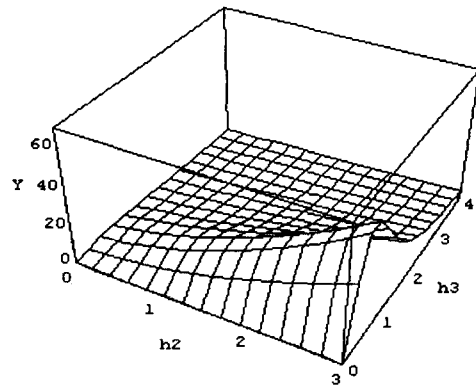


Fig. 5 Geometric parameter Y vs. h_2 and h_3

$$Y_{opt} = \frac{2\beta\eta(1+\beta\eta) + 2\beta\eta\sqrt{(1+\beta\eta)^2 + (\beta-\eta)^2}}{(\beta-\eta)^2} \quad (20)$$

와 같이 산정할 수 있다.

이상으로부터 지정된 손실계수를 가지는 최소 두께의 구속감쇠 적층보의 설계는

목적함수 : Minimize($h_2 + h_3$)

$$\text{제약조건: } Y_{opt} = \frac{3e_3h_3(1+2h_2+h_3)^2}{(1+e_3h_3)(1+e_3h_3^3)} \quad (21)$$

$$h_2 > 0, \quad h_3 > 0$$

과 같은 최적치 문제로 귀착된다. 따라서, 다양한

최적치 기법[10]등을 이용하면 특정 주파수에서 지정된 손실계수를 가지는 최소 두께의 구속감쇠 적층보를 설계할 수 있다.

상기의 최적화 방법으로 결정되는 구속감쇠 적층보의 최소두께는 주파수마다 달라진다. 이는 전단개변수 g 가 주파수의 함수일 뿐만 아니라 각 주파수별로 지정되는 손실계수가 다를 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 각 주파수별 최적설계 결과들중에서 모든 주파수대역에서 지정된 손실계수에 가장 근접한 손실계수를 갖는 최소두께 구속감쇠 적층보를

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_j (\eta_{ij} - \eta_{ij}^*)^2}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (22)$$

의 값이 최소인 경우로 결정하였다. 여기서, w_j 는 주파수별 설계 가중치, η_{ij} 는 각 주파수별 설계목적 손실계수, η_{ij}^* 는 i 번째 주파수에서의 식(21)에 의해 결정된 최적 두께를 적용했을 경우의 j 번째 주파수에서의 손실계수이다. 상기 식의 적용에 있어서 주파수별 설계가중치를 도입한 것은 기진력의 주파수 특성 또는 고체음 방사시에 인간의 소음인지특성 등을 고려하기 위한 것이다.

5. 수치계산 및 실험

5.1 점탄성 재료의 물성치 시험

실험에 사용된 점탄성재료의 전단탄성계수와 손실계수 파악을 위하여 제작한 샌드위치보의 기초 층과 점탄성층 및 구속층의 주요치수 등은 Table 2에 나타내었으며, 계측에 사용된 실험장치의 구성도는 Fig. 7에 나타내었다. 한편, 계측에 있어서 온도에 따른 점탄성 재료의 물성치 변화를 최소화하기 위하여 모든 실험은 25°C 전후의 상온에서 수행하였으며, 손실계수는 반감진법(half power bandwidth method)으로 계측하였다.

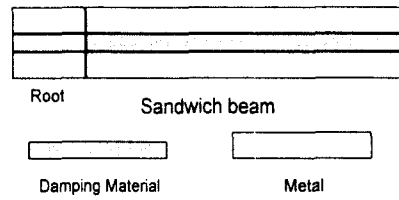


Fig. 6 Beam specimen

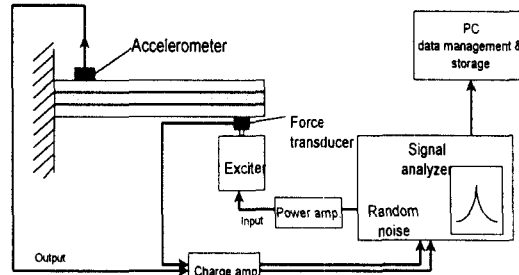


Fig. 7 Experimental set-up for the measurement of beam properties

Table 2 Properties of the sandwich beam

Layer	Material	Length (mm)	Breadth (mm)	Thickness (mm)	Density (g/cm ³)	Young's Modulus (N/m ²)
3	Steel	240	24.8	1	7.4	2.06 × 10 ¹¹
2	Viscoelastic material	240	24.8	3.2	1.35	
1	Steel	240	24.8	1	7.4	2.06 × 10 ¹¹

Table 3 Natural frequencies, f_n , and loss factors, η , of the metal and the sandwich beams

Mode	Metal beam		Sandwich beam	
	f_n (Hz)	η	f_n (Hz)	η
1	13.80	0.036	70.8	0.170
2	86.70	0.015	390.0	0.190
3	228.0	0.075	500.0	0.410
4	413.0	0.048	754.0	0.180
5	695.0	0.027	1040.0	0.230
6	1064.0	0.024	1224.0	0.230

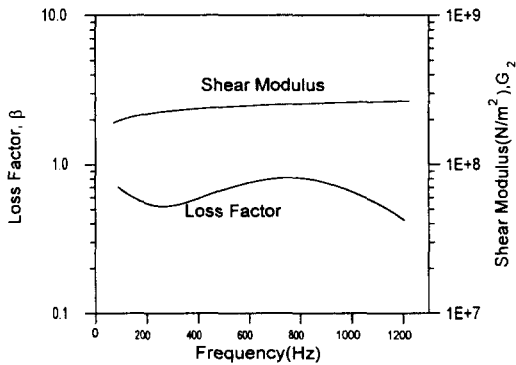


Fig. 8 Loss factor β and shear modulus G_2 of viscoelastic material

점탄성재료의 탄성계수와 손실계수를 구하는데 필요한 기초충만으로 구성된 금속보와 샌드위치보의 고유진동수 및 손실계수 계측결과는 Table 3에 나타내었다. 또한, 상기 결과를 이용하여 산정된 점탄성 재료의 손실계수와 전단탄성계수를 curve fitting시킨 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

5.2 구속감쇠 적층보의 손실계수

구속감쇠 적층보의 손실계수를 Fig. 9에 나타낸 흐름도에서와 같이 전단매개변수가 수렴할 때 적층보의 손실계수를 구하는 반복법(iteration procedure)으로 계산한 결과를 계측결과와 함께 Fig. 10에 나타내었다. 이로부터 대부분의 주파수 영역에서 손실계수의 실험 및 수치계산 결과의 부합성이 양호하나 1차 및 3차 고유진동수 근방의 주파수 영역에서는 차이가 큼을 알 수 있다.

상기와 같은 결과는 1차 모드의 경우 고차 모드와 비교하여 상대적으로 큰 진폭을 나타내어 손실계수 계측시에 비선형 효과가 크게 야기될 뿐만 아니라 샌드위치보를 이용한 점탄성재료의 탄성계수 및 손실계수 평가 방법이 저주파수영역에서는 정확도가 떨어지기 때문이다[3]. 한편, 3차 고유진동수인 500 Hz 근방에서 실험 및 수치계산 결과의 차이가 큰 것에 대해서는 보다 많은 검토가 필요할 것으로 사료된다.

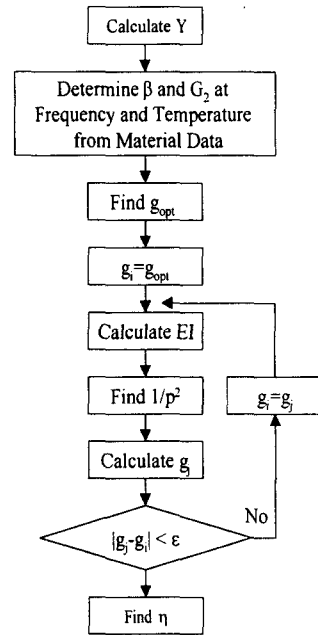


Fig. 9 Iteration procedure for determination of loss factor

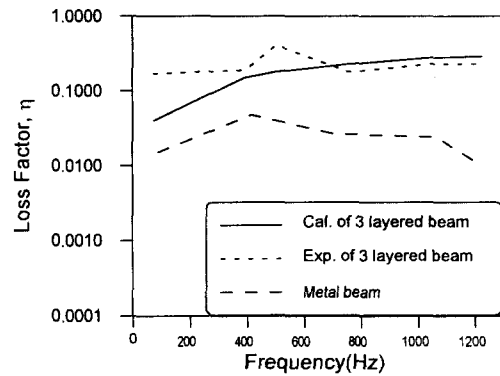


Fig. 10 Comparison of the loss factor obtained by the calculation and the experiment

5.3 구속층과 감쇠층의 최소두께를 위한 최적 설계변수 계산

점탄성재료의 물성치 평가에 사용된 구속감쇠

적층보와 동일한 손실계수를 가지는 최소 두께의 구속감쇠 적층보를 식(21)에 제시한 최적치 문제를 이용하여 설계한 결과를 Table 4에 나타내었다. 이때, 최적치 문제의 해는 범용 프로그램인 MATLAB[11]을 이용해서 구하였다.

상기 결과로부터 주파수에 따른 점탄성재의 물성치 변화로 인해 계산된 최적 두께가 주파수마다 달리 산정되나, 모든 설계대상 주파수에서 실험에 사용된 점탄성층과 구속층의 두께를 줄이고도 동등한 손실계수를 갖는 구속감쇠 적층보의 설계가 가능함을 확인할 수 있다. 또한, 구속층의 최적두께는 0.40mm~0.55mm로 편차가 0.15mm 이내임을 알 수 있다. 따라서, 기진원의 주파수 특성에 따라 제진주파수 영역이 결정되면 설계목적에 적합한 가중치 함수를 도입하여 최소두께를 갖는 구속감쇠 적층보의 설계가 가능하다고 판단된다.

본 연구에서는 Fig. 9에 제시한 적층보 손실계수 계산법을 이용해서 Table 4에 나타낸 감쇠층과 구속층 두께에 대해 모든 공진 주파수에서의 감쇠계수를 구한 결과를 Table 5에 나타내었다. 이에 는 각 고유진동수에서의 손실계수 가중치를 동일하게 설정한 경우에 식(22)로 결정되는 지정된 손실계수와와의 편차의 제곱합 S_i 도 함께 나타내었는데 구속층과 감쇠층의 두께가 각각 0.43 mm, 0.47 mm인 경우에 S_i 가 최소임을 알 수 있다. 따라서, 모든 주파수에서 지정된 손실계수와 가장 근접한 손실계수를 갖는 최소 두께의 구속감쇠 적층보는 1040 Hz에서 손실계수가 0.23이도록 설계한 결과임을 알 수 있다.

6. 결론

구속감쇠 적층보의 손실계수를 수치계산한 결과와 실험 결과를 비교·검토하고, 지정된 손실계수를 갖는 구속감쇠 적층보의 최적설계방법에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.


(1) 수치해석적 방법으로 구한 구속감쇠 적층보의 손실계수는 실험결과와 비교적 양호한 부합성을 나타내었다.

Table 4 Optimum values of design variables

Frequency(Hz)	$H_{2opt}(mm)$	$H_{3opt}(mm)$	Loss factor
70.8	0.06	0.40	0.17
390	0.16	0.42	0.19
500	1.62	0.55	0.41
754	0.16	0.43	0.18
1040	0.43	0.47	0.23
1224	0.47	0.47	0.23

Table 5 Values of η_{ij} and S_i

$H_{2opt}(mm)$	$H_{3opt}(mm)$	Frequency(Hz)						W_j	S_i
		70.8	390	500	754	1040	1224		
0.06	0.40	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	1	0.0136
0.16	0.42	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	1	0.0098
1.62	0.55	0.44	0.42	0.41	0.39	0.37	0.36	1	0.0339
0.16	0.43	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.17	1	0.0095
0.43	0.47	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	1	0.0072
0.47	0.47	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	1	0.0075

 : 지정된 손실계수

(2) 본 연구에서 제시한 지정된 손실계수를 갖는 구속감쇠 적층보의 최적 설계방법을 임의로 제작된 구속감쇠 적층보에 적용해 본 결과 구속층의 경우 40%~55%, 감쇠층의 경우 2%~51%의 두께만을 기초층에 취부하더라도 해당 주파수에서 동일한 손실계수를 갖는 구속감쇠 적층보를 제작할 수 있음을 확인하였다.

(3) 지정된 손실계수를 갖는 구속감쇠 적층보의 최소두께는 주파수별로 다르다. 따라서 특정 두께의 구속층과 감쇠층으로는 모든 주파수대역에서 지정된 손실계수를 갖는 구속감쇠 적층보를 설계하기는 어렵다. 다만, 각 주파수별로 설계가중치를 고려하면서 지정된 손실계수와 실제 설계되는 손실계수와와의 차의 제곱합이 최소가 되는 조건을 이용하면 모든 주파수 대역에서 지정된 손실계수에 가장 근접하는 값을 갖는 구속감쇠 적층보를 설계할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Mead, D.J., "Vibration Control(I)", Noise and Vibration, Edited by White, R.G. and Walker, J.G., Chapter 25, Ellis Horwood Limited, 1982.
- [2] Norton, M.P., Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers, Cambridge University Press, 1989.
- [3] Nashif, A.D., Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- [4] Ross, D., Ungar, E.E. and Kerwin, E.M., Jr., "Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminæ", Structural Damping, Edited by Ruzicka, J.E., Section 3, ASME, 1959.
- [5] Gade, S., Zaveri, K., Hansen, H. Konstantin and Herlufsen, H., "Stress/Strain Measurements of Viscoelastic Materials", Sound and Vibration, pp.16-19, March 1995.
- [6] Manor, H., Koss, L. and Kim, D.H., "User Manual for Program BED(Prediction of Bedplate Damping by use of Finite Elements)", Dept. of Mechanical Engineering, Monash University, 1991.
- [7] 유영훈, 양보석, "점탄성 제진재를 이용한 비구속형 제진강판의 최적설계에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제5권 제4호, pp. 493~501, 1995.
- [8] Saravanos, D.A. and Chamis, C.C., "Multiobjective Shape and Material Optimization of Composite Structures Including Damping", AIAA Journal, Vol. 30, No. 3, pp. 805~813, 1992.
- [9] Nashif, A.D., "Noise Control of Engine Structures", Noise Control in Internal Combustion Engines, Edited by Baxa, Chapter 8, John Wiley & Sons, Inc., 1982.
- [10] Vanderplaats, G.N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill Book Co., 1984.
- [11] MATLAB User's Guide, Math Works Inc., 1993.